

# LAS MACROFIBRAS DE VIDRIO Y SU EMPLEO PARA EL REFUERZO DE ELEMENTOS DE HORMIGÓN

## GLASS MACROFIBERS AND THEIR USED FOR CONCRETE ELEMENTS REINFORCEMENT

*B.E. Barragán<sup>1</sup>, G. Giaccio<sup>2</sup>, D.H. Monetti<sup>3</sup>, M.C. Torrijos<sup>4</sup>, R. Zerbino<sup>5</sup>*

*1.- Owens Corning*

*2.- Investigador Independiente CIC, LEMIT, Fac. de Ing. UNLP.*

*3.- Investigador Fac. de Ing. UNLP.*

*4.- Investigador Adjunto CONICET, LEMIT, Fac. de Ing. UNLP.*

*5.- Investigador Principal CONICET, LEMIT, Fac. de Ing. UNLP. zerbino@ing.unlp.edu.ar*

15

### RESUMEN

La incorporación de fibras otorga al hormigón capacidad de transferencia de cargas y control de la fisuración, con beneficios directos en la durabilidad de las estructuras. Si bien el vidrio resistente a los álcalis es excelente en cuanto a su adherencia y rigidez, hasta hace poco sólo se utilizaban microfibras para el control de la fisuración en estado plástico. Las macrofibras de vidrio abren nuevas posibilidades de aplicación, proveen refuerzo frente a efectos de la contracción térmica o por secado e incluso pueden actuar como armadura primaria. Estas macrofibras se distribuyen fácilmente en la mezcla fresca y son afines a la matriz cementícea favoreciendo la adhesión, poseen excelente resistencia a las condiciones ambientales e incrementan ligeramente la resistencia de primera fisura en el hormigón. Este trabajo describe la respuesta postpico típica observada para diferentes contenidos de macrofibras de vidrio y presenta dos estudios recientes, el primero comprende hormigones autocompactantes reforzados con macrofibras de vidrio y analiza la orientación del refuerzo en paneles delgados por efecto del flujo y el segundo estudia la respuesta en estado fisurado bajo cargas de larga duración de prismas fabricados con el hormigón utilizado para la construcción de un piso industrial.

**Palabras clave:** *macrofibras de vidrio, hormigón reforzado con fibras, creep, capacidad residual.*

### ABSTRACT

The incorporation of fibers confers load transfer capacity to concrete and controls cracks propagation,

with direct benefits for the structures durability. Although alkali resistant glass is excellent regarding adherence and stiffness, only microfibers have been used for controlling plastic shrinkage cracking. Glass macrofibers open new possibilities of application, provide reinforcement for thermal or drying shrinkage and they can even be used as primary reinforcement. These fibers disperse easily in the fresh mix and they have a total affinity with the cementitious matrix, they have excellent resistant against environmental conditions and slightly increase the first peak concrete stress. This work describes the typical post peak response observed for different contents of glass macrofibers and shows two recent studies, the first one includes self compacting concretes reinforced with glass macrofibers and analyzes the orientation of the reinforcement in thin walls due to the flow effect and the second studies the response under long term loads of cracked beams elaborated with a concrete used for the construction of an industrial floor.

**Keywords:** *glass macrofibers, fiber reinforced concrete, creep, residual capacity.*

## INTRODUCCIÓN

La incorporación de fibras al hormigón da lugar a un material de alto desempeño; las fibras controlan la propagación, ancho y espaciamiento de fisuras, incrementan la capacidad de transferencia de cargas en estado fisurado y mejoran el comportamiento en estado límite de servicio. El Hormigón Reforzado con Fibras (HRF) representa un material especialmente ventajoso en el caso de estructuras hiperestáticas como pisos industriales y pavimentos, que constituyen típicos ejemplos de aplicación. En estos casos, no sólo se producen ahorros en tiempos constructivos sino que la resistencia postfisuración del HRF incrementa la capacidad de carga estructural; además las fibras son particularmente efectivas para prevenir la fisuración por retracción y permiten reemplazar total o parcialmente la armadura de refuerzo convencional.

Si bien el uso de fibras como alternativa al refuerzo con malla electrosoldada o barras convencionales de acero es muy frecuente en la construcción de pisos, todavía está muy por debajo de su potencialidad. La falta de reglamentos específicos y/o la mera existencia de métodos de diseño semiempíricos muy conservadores, hizo que muchas veces no se adoptara el HRF como una alternativa competitiva; un avance muy importante constituye la introducción de apartados

específicos para el diseño de elementos con HRF en el fib Model Code 2010 (1). Dicho reglamento utiliza para la caracterización del HRF el ensayo de flexión que establece la norma EN 14651 (2) y en base a los parámetros allí obtenidos establece clases resistentes de HRF (los parámetros que considera la norma son la resistencia de primera fisura ( $f_L$ ) y las resistencias residuales  $f_{R1}$  y  $f_{R3}$  que se corresponden con aperturas de fisura iguales a 0,5 y 2,5 mm).

El reciente desarrollo de macrofibras de vidrio resistente a los álcalis que, además de controlar la fisuración en estado fresco, pueden actuar como armadura primaria aparece como alternativa para reemplazar al refuerzo de acero en aplicaciones específicas (3). Estas fibras otorgan al hormigón altas resistencias residuales para pequeñas aperturas de fisura lo que las hace particularmente aptas para uso en pavimentos y pisos industriales. Como ejemplos, las macrofibras de vidrio se han utilizado en losas de 250 mm de espesor en el Aeródromo Avialsa en España reemplazando las mallas de acero mediante la incorporación de 5 kg/m<sup>3</sup> de fibras; en un whitetopping de 100 mm de espesor sobre una autopista en Alemania con 12 kg/m<sup>3</sup> de fibras, o en el Maui Bridge Project en Hawái, donde se incorporaron 8 kg/m<sup>3</sup> de fibras a la losa para mejorar la resistencia a la fatiga y

reducir la fisuración por contracción. También han sido utilizadas como soluciones estructurales para viviendas para realizar pisos y cubiertas autonivelantes. Recientemente se realizó una prueba en Argentina durante la construcción de un piso industrial con hormigón bombeado que incorporaba  $10 \text{ kg/m}^3$  de fibras (4).

Este trabajo describe las propiedades mecánicas y la respuesta residual típica que otorga al hormigón el refuerzo con macrofibras de vidrio y presenta dos experiencias recientes: en primer lugar el desarrollo en laboratorio de hormigones autocompactantes con macrofibras de vidrio para estudiar la orientación del refuerzo por efecto del flujo en paneles delgados y en segundo término, la respuesta de prismas en estado fisurado bajo cargas de larga duración fabricados con el hormigón utilizado para construir dicho piso industrial.

### RESISTENCIA Y CAPACIDAD RESIDUAL QUE OTORGAN LAS MACROFIBRAS AL HORMIGÓN

La resistencia ( $1700 \text{ MPa}$ ) y el módulo de elasticidad del vidrio ( $72 \text{ GPa}$ ) resultan ideales para reforzar materiales frágiles como el hormigón. Las macrofibras de vidrio son afines a la matriz de cemento portland lo que favorece su adhesión. A la vez resultan particularmente aptas para sobrellevar

condiciones ambientales con alta humedad y por otro lado resistentes a temperaturas elevadas.

Las macrofibras de vidrio empleadas en las experiencias que se presentan en este artículo tienen  $36 \text{ mm}$  de largo y relación longitud/diámetro = 67; las dosis recomendadas varían entre  $5$  y  $15 \text{ kg/m}^3$ . Estas fibras se suelen incorporar al hormigón fresco previo a la descarga y luego de unos pocos minutos adicionales de mezclado, sea en hormigoneras tradicionales o en camiones tipo mixer, se distribuyen fácilmente y en forma uniforme en la mezcla (Figura 1); en general se recomienda no prolongar el mezclado en exceso. El HRF puede ser transportado, compactado y terminado con medios convencionales y también pueden obtenerse mezclas fluidas y autocompactantes.

Respecto a la influencia de estas macrofibras en la resistencia y capacidad residual del hormigón, la Figura 2 muestra la respuesta a flexión tensión-apertura de fisura (CMOD) típica de hormigones de  $25 \text{ MPa}$  de resistencia característica a compresión, que incorporan  $0, 5, 10$  y  $15 \text{ kg/m}^3$  de macrofibras. Se observa que la tensión máxima coincide con la tensión de primera fisura ( $f_t$ ) pero, a diferencia de lo que suele ocurrir con macrofibras sintéticas o de acero, a medida que crece el contenido de refuerzo se incrementa la resistencia de primera fisura,

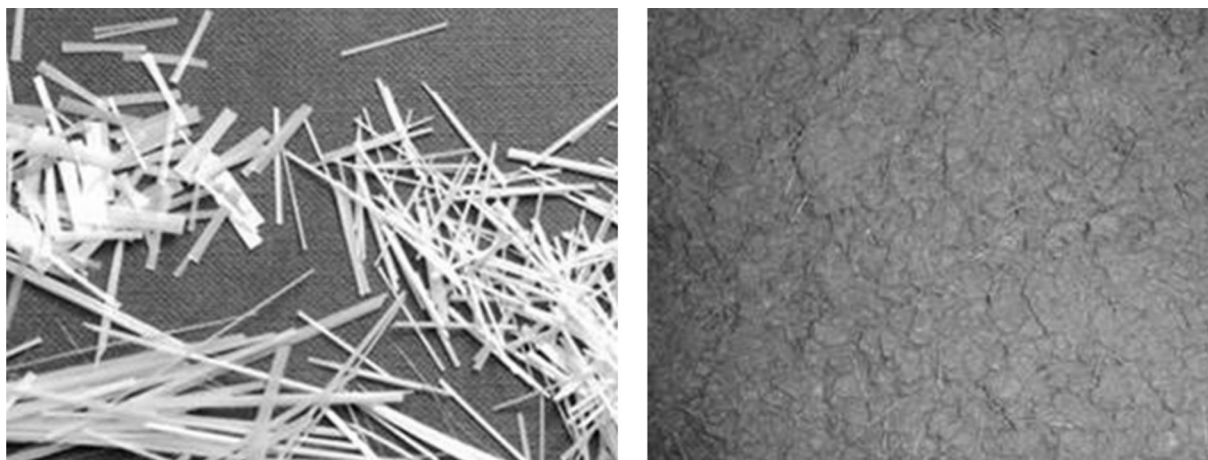
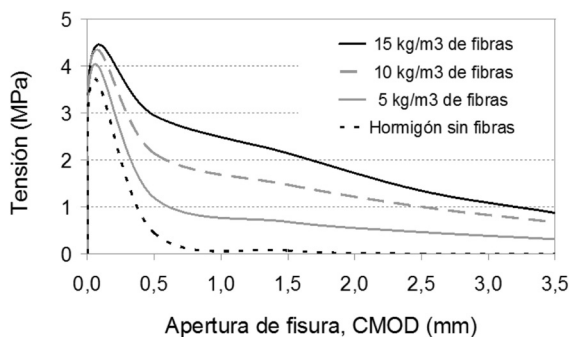


Figura 1. Aspecto de las macrofibras de vidrio y del HRF en estado fresco.

hecho que se atribuye a la excelente adhesión de estas fibras. Además se aprecia que para aperturas de fisura bajas-medias la resistencia residual ( $f_{R1}$  a  $\text{CMOD} = 0,5 \text{ mm}$ ) es elevada y luego se produce una caída progresiva de la capacidad portante.

Cabe destacar que si bien se verifica un decrecimiento importante para grandes aperturas de fisura, es casi exclusivamente la resistencia residual  $f_{R1}$  la que determina el comportamiento de estructuras altamente hiperestáticas. El fib Model Code (1) propone una formulación genérica para todo tipo de elementos estructurales, no para el caso específico de pisos con su alto grado de hiperestaticidad que conduce a muy pequeñas aperturas de fisura ( $< 0,5 \text{ mm}$ ) para la carga última de las losas. Esto mismo se da para el caso de pavimentos de hormigón donde por ejemplo el Método de Diseño Estructural AASHTO 93 también limita las fisuras admisibles a  $0,5 \text{ mm}$  cuando evalúa el uso de armaduras. Por tanto el cálculo debiera ser guiado básicamente por valores de  $f_{R1}$ . En el mismo sentido, otras guías de diseño de pisos (5) proponen el uso de valores medios de resistencia residual. En base a estas consideraciones las soluciones con HRF resultan más competitivas, manteniendo el nivel adecuado de seguridad.



**Figura 2.** Respuesta tensión - apertura de fisura en flexión de un hormigón con diferentes contenidos de macrofibras de vidrio. EN 14651

## EXPERIENCIAS

En este apartado se presentan dos experiencias

recientes de hormigones elaborados con macrofibras de vidrio. En primer lugar en estudios de laboratorio se verificó la posibilidad de incorporar estas fibras en hormigones autocompactantes y se analizó en particular la influencia de la orientación del refuerzo por efecto del flujo con el fin de optimizar su uso en elementos delgados. En segundo término con un hormigón bombeado reforzado con  $10 \text{ kg/m}^3$  de macrofibras se moldearon en obra probetas prismáticas que, luego de fisuradas, se sometieron a cargas de larga duración a fin de estudiar la evolución de la apertura de fisura para analizar la influencia de las fibras en estructuras típicas que trabajan en estado fisurado como es el caso de los pavimentos.

### Orientación de las macrofibras en paneles delgados fabricados con hormigón autocompactante

Dada la estrecha relación entre el número de fibras en las superficies de fractura y los parámetros postpico del HRF, la eficiencia del refuerzo dependerá para cada tipo y contenido de fibra de su distribución y orientación. Se ha demostrado que aunque las fibras se distribuyan homogéneamente durante el mezclado las condiciones de llenado y compactación pueden modificar su orientación dentro de los elementos estructurales, en particular si se trata de elementos delgados.

La velocidad de flujo y el efecto pared inciden en la orientación de las fibras en hormigón autocompactante (6-10). Tanto con fibras de acero como con macrofibras sintéticas se ha observado que el flujo puede dar lugar a una respuesta anisotrópica en diferentes elementos estructurales, lo que debe ser tenido en cuenta al emplear los parámetros de resistencia postpico para el diseño estructural.

Se elaboraron dos hormigones autocompactantes reforzados con  $5$  y  $10 \text{ kg/m}^3$  de macrofibras de vidrio (HACRFV-5 y HACRFV-10). Con ellos se llenaron paneles de  $580 \text{ mm}$  de altura,  $2000 \text{ mm}$  de largo y  $80 \text{ mm}$  de espesor vertiendo el

hormigón desde un extremo y sin compactar (Figura 3). Con el fin de analizar la distribución y orientación del refuerzo y sus efectos sobre las propiedades residuales en flexión se aserraron a lo largo de cada panel prismas de 80x80x300 mm. Los prismas verticales identificados como VS y VI, paralelos a la dirección de moldeo, fueron extraídos respectivamente de la parte superior e inferior del panel; los prismas H se ubican en dirección horizontal perpendicular al moldeo. Como referencia para realizar la caracterización mecánica de cada hormigón, también se moldearon cilindros de 100x200 mm y prismas de 75x100x430 mm.

Para los ensayos de flexión se siguieron los lineamientos generales de la norma EN 14651, controlando la velocidad de apertura de fisura (CMOD) mediante un dispositivo tipo clip colocado en los bordes de la entalla. En el caso de los prismas de 75x100x430 mm se utilizó una luz de ensayo de 350 mm, mientras que en los prismas aserrados del panel una luz de ensayo de 280 mm. En ambos casos las relaciones luz/altura y profundidad de entalladura/altura se mantuvieron iguales a las indicadas en la norma.

El HACRFV-5 de relación agua/ligante 0,40, fue preparado con cemento portland normal, filler calcáreo y cenizas volantes, arena silícea natural y piedra partida granítica de 19 mm de tamaño máximo. El diámetro de escurrimiento del hormigón de base fue igual a 650 mm y se redujo a 620 mm al incorporar las fibras; el

diámetro del escurrimiento con anillo sin fibras fue igual a 610 mm y se redujo a 530 mm en el HACRFV mostrando algunos signos de bloqueo. La resistencia a compresión igual a 41 MPa y en las probetas ensayadas a flexión la tensión de primera fisura ( $f_L$ ) fue igual a 5,1 MPa y las resistencias residuales para 0,5 mm y 2,5 mm de CMOD ( $f_{R1}$  y  $f_{R3}$ ) fueron iguales a 3,3 y 1,5 MPa respectivamente.

En el HACRFV-10 la relación agua/ligante fue 0,35, y fue preparado con cemento portland con filler calcáreo, cenizas volantes, arena silícea natural y piedra partida granítica de 12 mm de tamaño máximo. El diámetro de escurrimiento fue igual a 610 mm, la resistencia a compresión a 46 MPa y en las probetas ensayadas a flexión se obtuvo una tensión de primera fisura ( $f_L$ ) igual a 6,9 MPa y  $f_{R1}$  y  $f_{R3}$  iguales a 3,6 y 1,7 MPa respectivamente.

La Figura 4 presenta las curvas tensión - apertura de fisura (CMOD) de cada prisma aserrado del HACRFV-5. En general los prismas H presentan mayor capacidad post pico, lo que permite inferir que las fibras se orientaron preferentemente en la dirección del flujo; además se observa una mejor capacidad residual en los prismas de la zona donde se inició el llenado del panel (H1-H7) que en los prismas del tramo final (H8-H14). A su vez las probetas de la parte inferior (H6-7 y H12-14) presentan mayores tensiones de primera fisura y mayor capacidad residual que las de la zona superior, siendo el efecto más notorio en el final

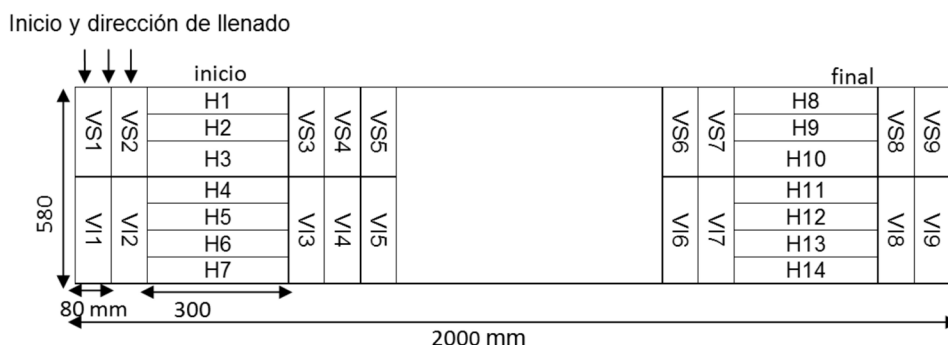


Figura 3. Esquema de aserrado del panel.



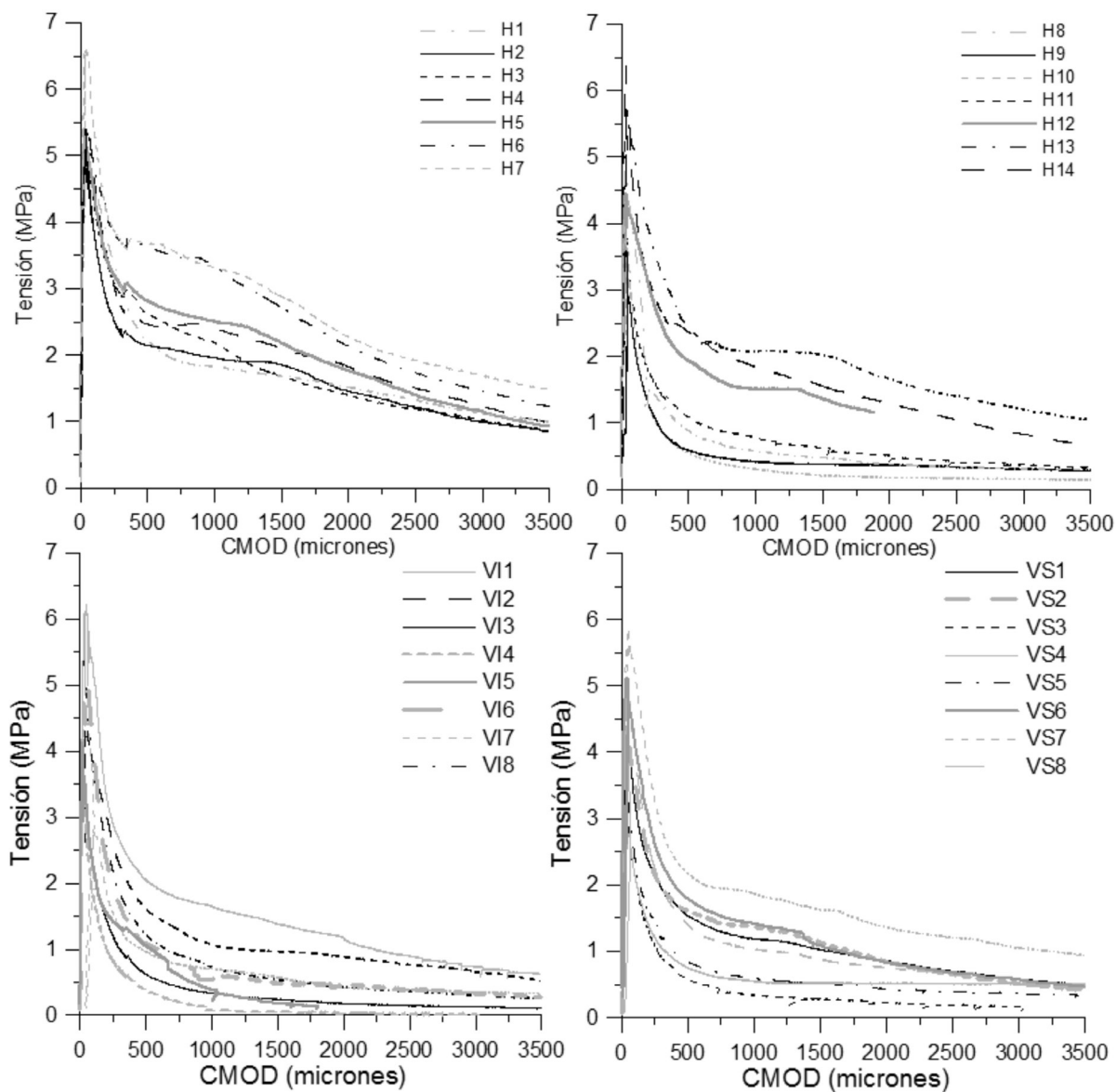
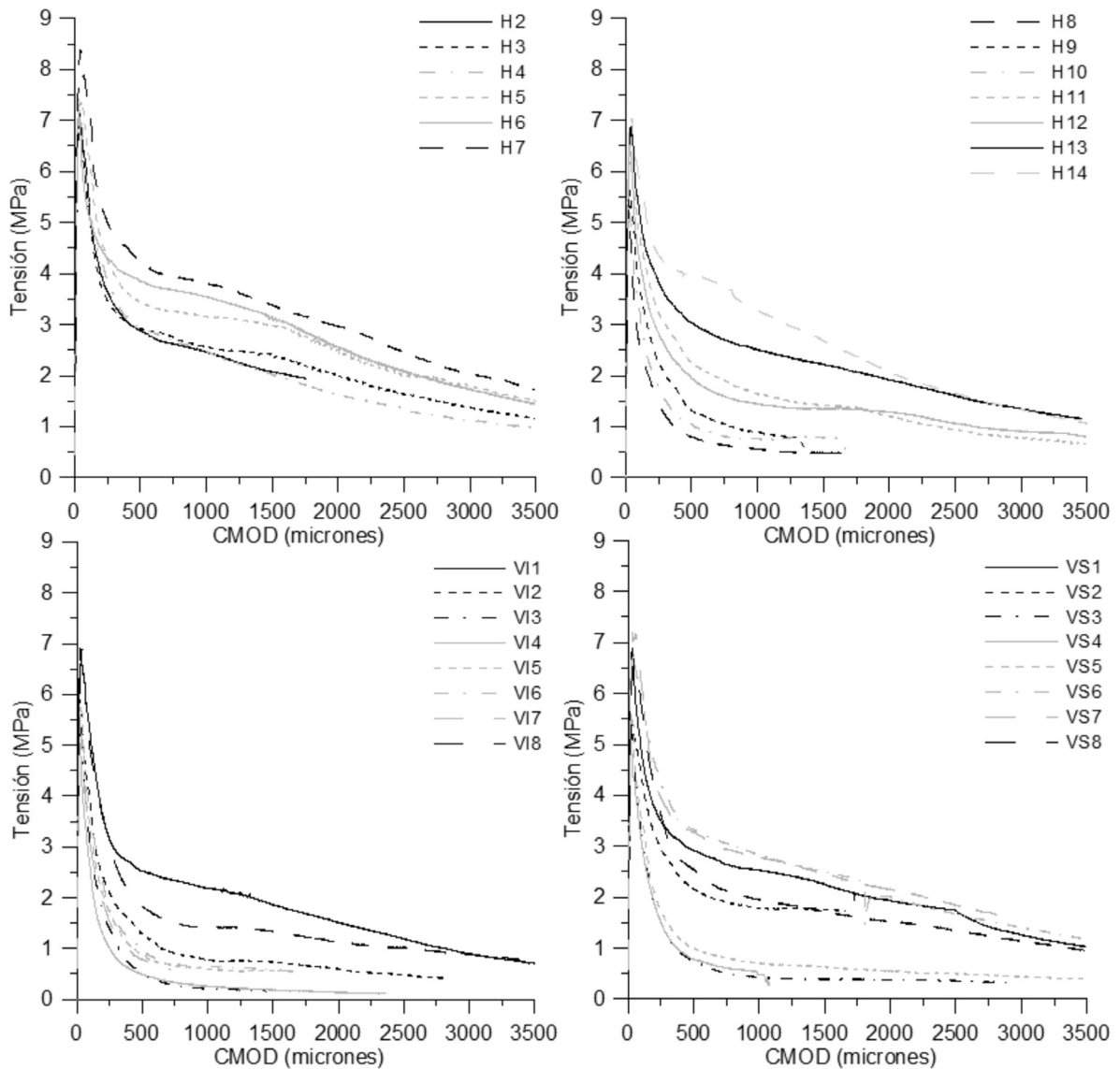


Figura 4. HACRFV-5: curvas tensión-apertura de fisura (CMOD).

del panel (H12-14). En los prismas verticales las tensiones residuales fueron ligeramente mayores en la mitad superior de la placa (VS) que en la mitad inferior (VI), verificando la mayor orientación preferencial en dirección horizontal en la base del panel. Un comportamiento similar fue encontrado con otros tipos de fibras (10). Es interesante notar que aunque todos los prismas fueron aserrados de un mismo panel se observaron cambios en la resistencia de primera fisura, de esto

se infiere que el contenido de fibras orientadas en dirección normal a la superficie de fractura no sólo contribuye a la capacidad residual sino que también aumenta la resistencia de primer pico, cosa no es usual para otros tipos de fibras.

En forma análoga la Figura 5 presenta las curvas tensión - apertura de fisura (CMOD) para los prismas del HACRFV-10. Como era de esperar la capacidad residual resulta mayor con este



**Figura 5.** HACRFV-10: curvas tensión-apertura de fisura (CMOD).

contenido de macrofibras. Se verifican tendencias similares: mayor capacidad residual en los prismas H de la zona donde se inició el llenado del panel (H1-H7) con respecto los del final (H8-H14) y menor capacidad residual en los prismas verticales, en especial en los de la zona inferior. Para este contenido de fibras la capacidad residual de los prismas verticales no resultó tan afectada y se encuentra más cercana (aunque siempre inferior) a los horizontales. Nuevamente la resistencia de

primera fisura tiende a crecer en los prismas con mayor capacidad residual.

Una vez finalizados los ensayos de flexión se hizo un relevamiento del contenido de fibras en las superficies de fractura. La Figura 6 muestra los resultados de la densidad de fibras en el panel, se aprecia la influencia de las paredes del molde sobre la orientación de las fibras con tendencias similares en ambos HACRFV. En los prismas verticales

la densidad disminuye en el centro del panel y aumenta cerca de los bordes; se observa mayor densidad en la parte superior, lo que indica que la base del panel orienta las fibras en su dirección. En los prismas horizontales la densidad de fibras es mayor cerca del piso del molde y disminuye con la altura siendo este efecto mayor en los prismas aserrados al final del panel (H8-H14). En el inicio del panel HACRFV-5, la densidad de fibras en el borde superior (H1) es un 10% menor que en el borde inferior (H7), mientras que hacia el final del panel en el borde superior (H8) la densidad es un 64% menor. En HACRFV-10 estas diferencias son aún mayores (30% y 74% respectivamente). Considerando los efectos del flujo de hormigón, la densidad de fibras es mayor en los prismas aserrados al inicio del panel (H1-H7) que en los de

la parte final (H8-H14). La orientación de las fibras en los prismas horizontales por efecto pared de la base del panel y por cambios en la velocidad del flujo entre el inicio y el final del molde fue también observada en paneles de HAC reforzados con fibras de acero y con macrofibras sintéticas (10). La orientación de las fibras se ajusta y justifica el comportamiento diferencial de la capacidad residual de los prismas observada en los ensayos de flexión.

En base a los resultados obtenidos sobre cada uno de los prismas aserrados de ambos paneles, en la Figura 7 se presenta la variación con la densidad de fibras de los parámetros de diseño considerados en el fib Model Code 2010 para FRC, la tensión de primera fisura ( $f_t$ ) y las resistencias residuales  $f_{R1}$

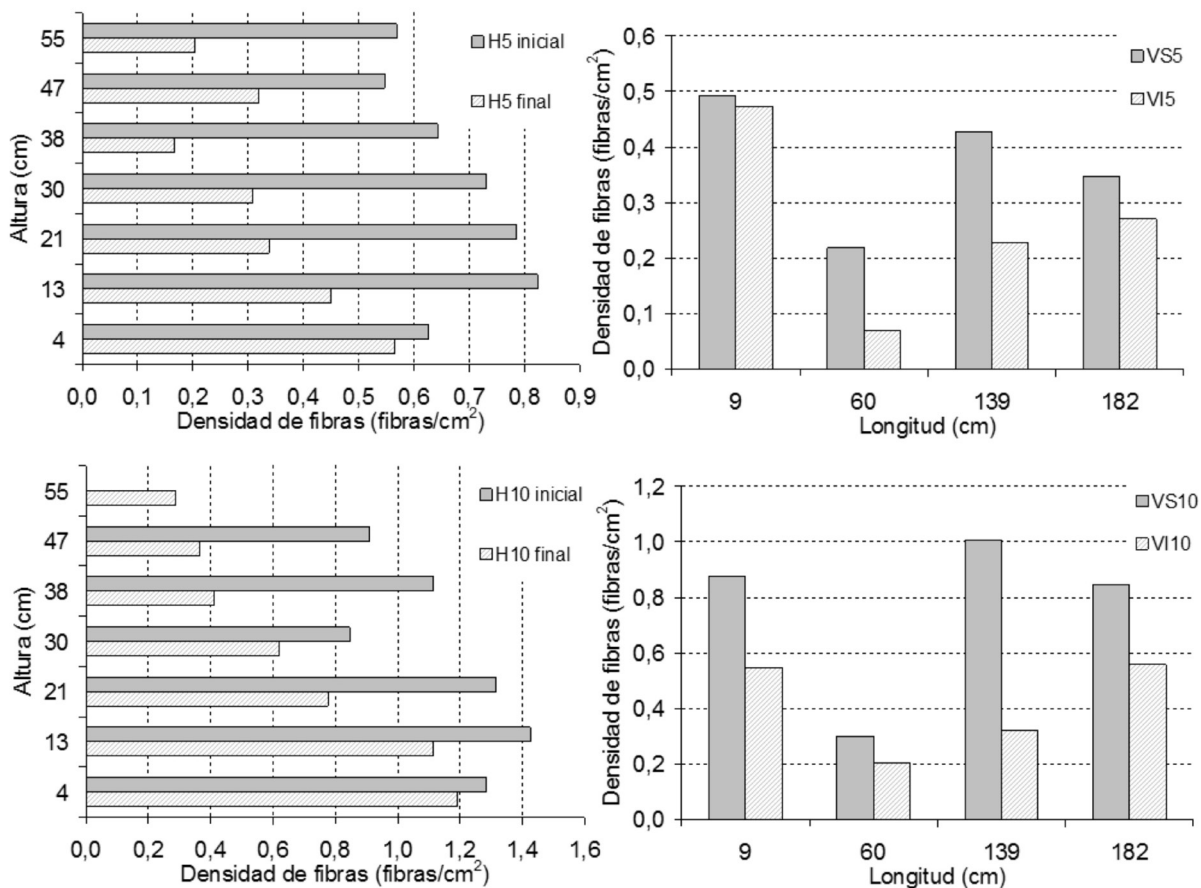
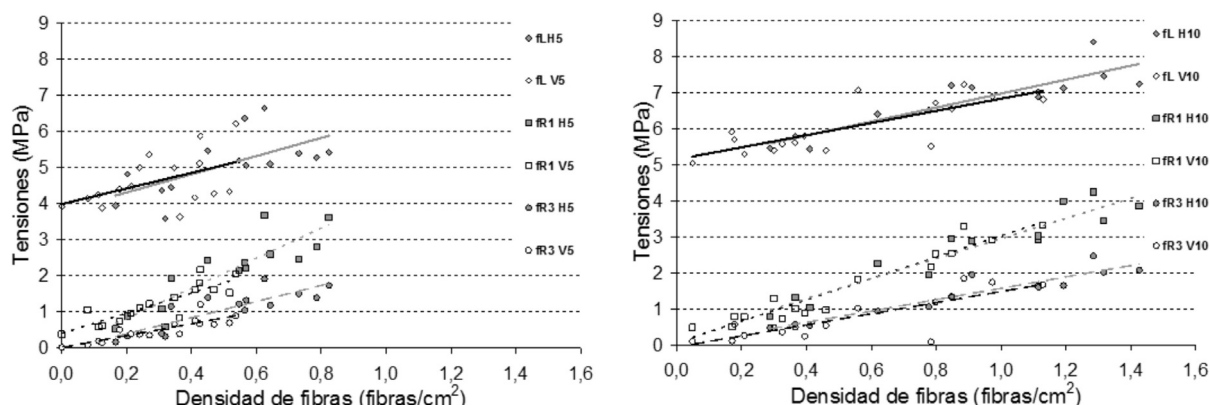


Figura 6. Variación de la densidad de fibras en el panel. Arriba: HACRFV-5, abajo: HACRFV-10.





**Figura 7 a-b.** Variación de la tensión máxima ( $f_L$ ), y las tensiones residuales  $f_{R1}$  y  $f_{R3}$  en función de la densidad de fibras en la superficie de fractura. Valores individuales de las vigas aserradas en distintas posiciones y orientaciones de los paneles de a- HACRFV-5 y b- HACRFV-10.

y  $f_{R3}$ . Como era de esperar,  $f_{R1}$  y  $f_{R3}$  aumentan con la densidad de fibras. Pero además, y a diferencia de lo que suele ocurrir con otros tipos de fibras,  $f_L$  aumenta a medida que crece la densidad de macrofibras de vidrio en las superficies de fractura; este hecho representa un dato significativo en aplicaciones donde el control de fisuras es relevante.

### Fluencia en estado fisurado

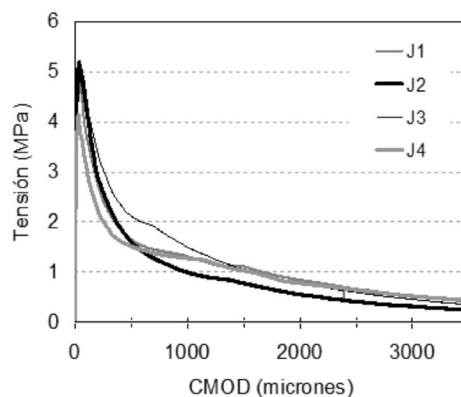
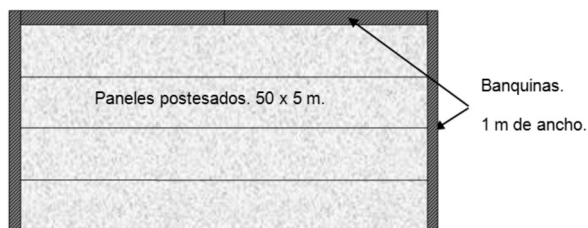
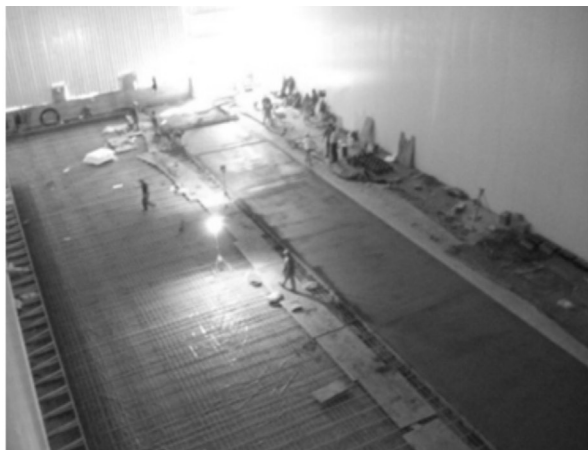
Los estudios de fluencia en estado fisurado se realizaron sobre prismas moldeados en obra durante la construcción de un piso industrial en Ituzaingó, provincia de Buenos Aires (4). Dicho HRF fue preparado con relación agua/cemento 0,49, 340 kg/m³ de cemento, 20 kg/m³ de microsilíce, 830 kg/m³ de arena y 1050 kg/m³ de piedra (tamaño máximo 19 mm); aditivo expansor (20 kg/m³), aditivo reductor de contracción (5,1 kg/m³) y una combinación de reductores de agua de medio y alto rango, que permitieron incorporar 10 kg/m³ de fibras y obtener un HRF bombeable con un asentamiento promedio de 180 mm.

Para el control de calidad se moldearon cilindros de 100x200 mm para evaluar la resistencia a compresión y prismas de 150x150x600 mm para

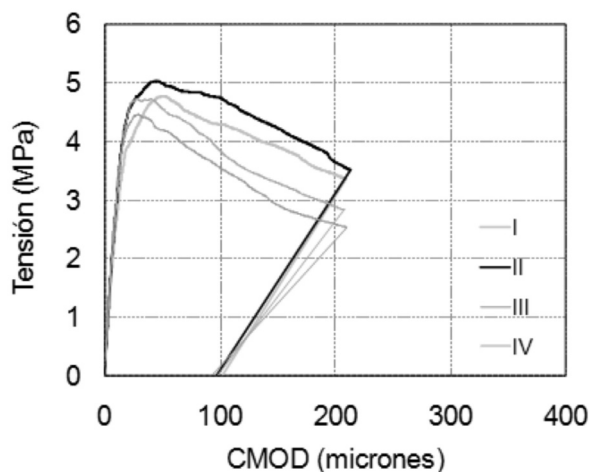
valorar la resistencia y capacidad residual en flexión siguiendo la norma EN14651. Todas las probetas se desmoldaron a las 24 horas y luego se ubicaron en cámara húmeda hasta la edad de ensayo. A los 28 días la resistencia a compresión fue igual a 48,4 MPa, la resistencia de primera fisura a flexión fue 6,0 MPa y las resistencias residuales  $f_{R1}$  y  $f_{R3}$  del orden de 1,7 y 0,6 MPa respectivamente.

La Figura 8 muestra aspectos relativos a la construcción del piso industrial; el llenado se hizo en cuatro jornadas, realizando en cada una paños de 50 m de largo por 5 m de ancho. La figura incluye la respuesta en flexión de una de las vigas moldeadas para control de calidad en cada jornada que evidencian la poca variabilidad en la respuesta residual del FRC.

Además de emplear prismas para realizar la caracterización mecánica y control en obra, se utilizaron otros similares para evaluar la respuesta bajo cargas de larga duración en estado fisurado. Cuatro prismas (A, B, C y D) fueron cargados con la misma configuración de ensayo prevista en la norma EN 14651 hasta alcanzar un CMOD de 0,2 mm, acorde con los límites tolerados en aplicaciones convencionales como pavimentos y algunos pisos industriales. La tensión nominal al momento de detener el proceso de prefisuración



**Figura 8.** Construcción del piso industrial y curvas tensión – apertura de fisura del FRC usado en obra.



**Figura 9.** tensión – apertura de fisura durante la fisuración previa a los ensayos de creep.

se identifica como  $f_{0.2}$ , y la apertura de fisura residual al momento de la descarga como CODres. La Figura 9 muestra las curvas carga – apertura de fisura durante la fisuración previa; se aprecia una recuperación elástica similar en todas las probetas durante la descarga.

Luego se fijó en cada viga fisurada un extensómetro mecánico (Figura 10) para registrar las variaciones de la apertura de fisura. Las vigas se ubicaron de a pares en pórticos donde, a través de un sistema de pesas y palancas, se aplicaron cargas de larga duración de modo de provocar esfuerzos comprendidos entre 53 y 80 % de la tensión máxima nominal aplicada en la fibra extrema inferior de cada prisma al momento de detener el ensayo de fisuración inicial.



Figura 10. Aplicación de cargas de larga duración.

La Figura 11 muestra la evolución de la apertura de fisura de cada prisma durante 7 meses bajo carga; se aprecia que, a excepción del prisma IV, luego de un crecimiento inicial más rápido las curvas tienden a estabilizarse. La Tabla 1 resume los resultados obtenidos incluyendo para cada viga, la tensión nominal durante la prefisuración para la apertura de fisura de 0.2 mm ( $f_{0.2}$ ), la apertura de fisura residual al descargar ( $COD_{res}$ ), la tensión nominal permanente aplicada en los ensayos de creep ( $f_{creep}$ ) y la apertura de fisura diferida luego de 210 días bajo carga ( $COD_{dif}$ ). La Tabla 1 también incluye una velocidad de crecimiento

de la apertura de fisura calculada entre los 30 y 90 días bajo carga permanente ( $COD_{vel.30-90}$ ), este periodo se considera suficiente para que se alcance una estabilización en el crecimiento del COD (11). La velocidad de apertura de fisura tuvo valores menores a 0,25 mm/año. Durante el tiempo bajo carga no se registraron roturas en las probetas; a la vez se observó que la velocidad de apertura de fisura se redujo sensiblemente para esfuerzos permanentes menores al 70 % de la resistencia al momento de detener la fisuración; considerando la importancia de lograr condiciones para que la fisura se estabilice se recomienda no superar este nivel de carga.

Finalmente, luego de varios meses bajo carga se descargaron los prismas y se volvieron a realizar

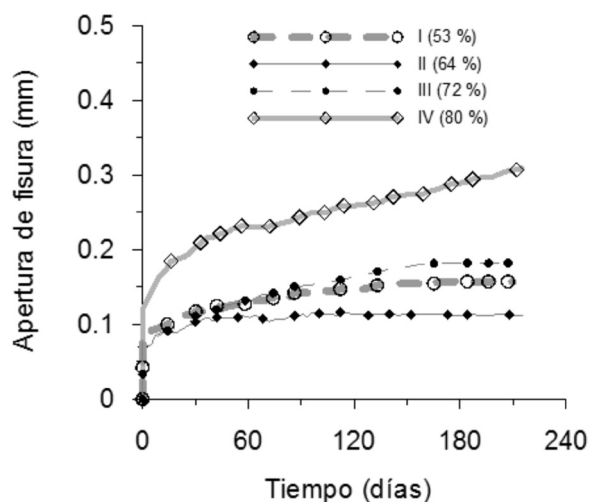
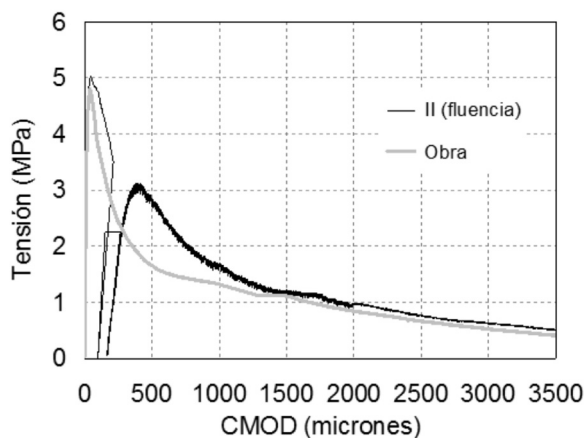


Figura 11. Curvas apertura de fisura- tiempo y tensión- tiempo bajo cargas sostenidas.

Tabla 1. Ensayos de creep en estado fisurado luego de 210 días bajo carga

Prisma	$f_{0.2}$ (MPa)	$COD_{0.2}$ (mm)	$COD_{res}$ (mm)	$f_{creep}$ (MPa)	$f_{creep}$ (% $f_{0.2}$ )	$COD_{dif}$ (mm)	$COD_{vel.30-90}$ (mm/año)
I	3,36	0,210	0,102	1,77	53	0,158	0,14
II	3,51	0,213	0,097	2,24	64	0,112	0,07
III	2,54	0,210	0,092	1,84	72	0,182	0,23
IV	2,83	0,208	0,098	2,26	80	0,307	0,25

ensayos de flexión con la misma configuración de carga de la norma EN14651 con el fin de evaluar el efecto de las cargas sostenidas sobre la capacidad de carga residual. La Figura 12 muestra la curva de la etapa de prefisuración seguida por la respuesta tensión – apertura de fisura luego del ensayo de fluencia y se la compara con la curva tensión – apertura de fisura del hormigón de la obra. Es posible observar que al volver a cargar la curva sigue la tendencia de la curva original con el desplazamiento propio de la deformación ocurrida durante el periodo bajo carga sostenida, sin embargo es de destacar que las cargas de larga duración no provocaron mayores reducciones en la capacidad residual para grandes aperturas de fisura, siendo incluso los valores promedio de las resistencias residuales superiores a las originales del hormigón empleado en obra, lo que puede estar indicando alguna evolución de la adherencia en el tiempo.



**Figura 12.** Curva tensión – apertura de fisura del hormigón de la obra y curva tensión – apertura de fisura de la etapa de prefisuración seguida de la curva tensión – apertura de fisura luego del ensayo de fluencia.

## CONCLUSIONES

Este trabajo presenta algunos estudios realizados sobre hormigones que incorporan macrofibras de vidrio de reciente aparición en el mercado. Se incluye el análisis de la orientación de las fibras en paneles delgados fabricados con hormigones

autocompactantes elaborados en laboratorio y el estudio de la respuesta diferida bajo cargas de larga duración en estado fisurado de probetas fabricadas en obra. Los resultados muestran que:

- El hormigón con macrofibras de vidrio posee una respuesta residual diferente a la observada con otros tipos de fibras, caracterizada por un incremento en la tensión de primera fisura a medida que crece el contenido de fibras y una resistencia residual significativa para pequeñas aperturas de fisura seguida por una caída gradual y progresiva de la capacidad residual para aperturas mayores. Esto es significativo considerando que tanto en pisos industriales como en pavimentos de hormigón el tamaño de fisuras tolerado es pequeño ( $< 0,2\text{mm}$ ).
- En elementos delgados fabricados con hormigón autocompactante reforzado con macrofibras de vidrio se verifica la influencia del efecto pared y de la velocidad de flujo. Se observó un comportamiento mecánico diferencial entre prismas aserrados en diferentes direcciones y la variación de la densidad de fibras en las superficies de rotura es consistente con los cambios observados en las propiedades mecánicas. Si bien como ocurre con otras fibras se verifica un aumento de la capacidad residual con la densidad de fibras, se observó como característica singular que con las macrofibras de vidrio las tensiones de primera fisura aumentan a medida que crece la densidad de fibras.
- Los estudios de fluencia con pequeñas aperturas de fisura iniciales ( $0,2\text{ mm}$ ), muestran que no se produjeron roturas luego de varios meses bajo cargas de hasta el 80 % de la resistencia al momento de detener la fisuración con velocidades de crecimiento de fisuras menores a  $0,25\text{ mm/año}$ ; dicha velocidad se redujo sensiblemente cuando los esfuerzos no superaron el 70 % de la resistencia residual al momento de detener la fisuración, por lo que aparece recomendable no superar este nivel de sollicitación para alcanzar una respuesta estable.

## REFERENCIAS

- 1.- Fédération Internationale du Béton. (2013) fib Model Code for Concrete Structures 2010. Ernst & Sohn (eds), Berlin, Alemania, 434 p.
- 2.- BS (2005) EN 14651:2005 Test method for metallic fibered concrete - Measuring the flexural tensile strength (Limit of proportionality (LOP), residual), London, UK, BSI.
- 3.- Ridd, P. "The use of Alkali Resistant Glass Fibres in Floor Construction",
- 4.- Zerbino R., Giaccio G., Barragán, B.E, Peyrú, E. "Hormigones reforzados con macrofibras de vidrio: comportamiento mecánico y aplicaciones" VI Congreso Internacional, 20a Reunión Técnica, Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, 2014 Concordia - Entre Ríos - Argentina, Ed: J. Sota, pp. 167-174.
- 5.- Guía CONPAVIPER, Associazione Nazionale Pavimentazioni Continue, 2010, Italy.
- 6.- Torrijos MC, Barragán B, Zerbino R. Placing conditions, mesostructural characteristics and post-cracking response of fibre reinforced self-compacting concretes, Construction and Building Materials 2010, 24: 1078–1085.
- 7.- Stähli P, van Mier JGM. Manufacturing, fibre anisotropy and fracture of hybrid fibre concrete. Engng Fract Mech 2007; 74: pp. 223–242.
- 8.- Vandewalle L, Heirman G, Rickstal FV. Fibre orientation in self-compacting fibre reinforced concrete. In: Gettu R, editor. Proceedings of 7th Int. RILEM Symposium on Fibre Reinforced Concrete. India: Chennai 2008. p. 719-728.
- 9.- Ferrara L, di Prisco M, Khurana R. Tailoring optimum performance for the structural use of self consolidating SRFC. En: Gettu R, editor. Proceedings of 7th Int. RILEM Symposium on Fibre Reinforced Concrete. India: Chennai 2008. pp. 739-750.
- 10.- Zerbino R., Tobes J.M., Bossio M.E. and Giaccio G. "On the orientation of fibres in structural members fabricated with self compacting fibre reinforced concrete" Cement & Concrete Composites 34 (2012) pp. 191–200.
- 11.- Serna Ros, P., Martí-Vargas, J.R., Bossio, M.E., & Zerbino, R. (2015). Creep and residual properties of cracked macro-synthetic fibre reinforced concretes. Magazine of Concrete Research, <http://dx.doi.org/10.1680/mac.15.00111>.